

## STF2 加速器の電力分配系の性能評価

### PERFORMANCE OF THE POWER DISTRIBUTION SYSTEM IN THE STF2 ACCELERATOR

沼田直人<sup>#, A)</sup>, 石本和也<sup>A)</sup>, 埜泰河<sup>A)</sup>, 明本光生<sup>B)</sup>, 荒川大<sup>B)</sup>,  
片桐広明<sup>B)</sup>, 中島啓光<sup>B)</sup>, 松本修二<sup>B)</sup>, 松本利広<sup>B)</sup>, 三浦孝子<sup>B)</sup>

Naoto Numata<sup>#, A)</sup>, Kazuya Ishimoto<sup>A)</sup>, Taiga Hanawa<sup>A)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>B)</sup>, Dai Arakawa<sup>B)</sup>,  
Hiroaki Katagiri<sup>B)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>B)</sup>, Syuji Matsumoto<sup>B)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>B)</sup>, Takako Miura<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> NAT Corporation

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

The STF-2 accelerator has been developed to realize the International Linear Collider (ILC) at the Superconducting rf Test Facility in the KEK. In this winter operation, the power distribution system consisted with variable hybrid variable phase shifter and so on was constructed and the RF output generated from 10 MW multibeam klystron was fed to the twelve superconducting cavities by use of this power distribution system for beam acceleration operation. During the period of operation, there were some discharge troubles inside the waveguide of the power distribution system, but finally an energy gain of 307.5 MeV was achieved and this average acceleration gradient was 32.9 MV/m, which is consistent with the 33.0 MV/m evaluated by the cavity electric field monitor. In this paper, the status and the performance of the power distribution systems in the STF-2 accelerator are described.

#### 1. はじめに

KEKの超伝導RF試験施設(STF)では、国際リニアコライダー(ILC)開発に向けた、超伝導空洞を用いた線形加速器(STF2 加速器)の建設を進めている。この STF2 加速器は、3 台の運転周波数 1.3 GHz、繰り返し 5 Hz、RF パルス幅 1~1.65 ms の高周波源を持ち、常伝導の RF 電子銃空洞、2 台の超伝導空洞、12 台の超伝導空洞へマイクロ波(RF)を供給する構成となっている(Fig. 1)。

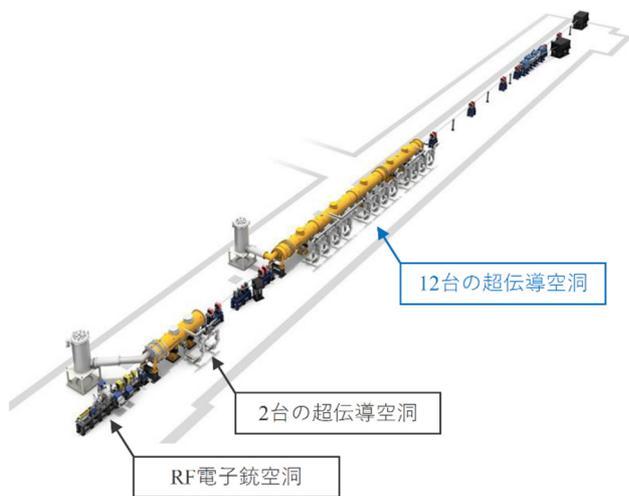


Figure 1: The STF-2 accelerator.

ILCの高周波電力分配系は、各空洞のクエンチリミット近くまでパワー供給し、加速位相を調整可能とすること

<sup>#</sup> nat-numa@post.kek.jp

である。また、低電力高周波制御系はベクターサムフィードバック制御による、振幅と位相の安定化を実現することである。電力分配系は、各種コンポーネント(可変ハイブリッド、移相等)[1]の開発及びそれらのシステム開発を行ってきた。2021年3月から4月にかけての運転では、はじめて1台の高周波源で12台の超伝導空洞へRFの供給、ビーム加速試験が行われた。本報告では、電力分配系を中心にシステム構築、調整作業及び実験結果の報告を行う。

#### 2. STF2の高周波電力分配系

##### 2.1 高周波系

STF-2 加速器の高周波系は、基準発振器で 1.3 GHz の CW 信号を生成、I/Q 変調器、増幅器等を用いて、運転周波数の RF を各高周波系に配信する構成を採用している[2]。パルス変調された RF は、タイミング信号と

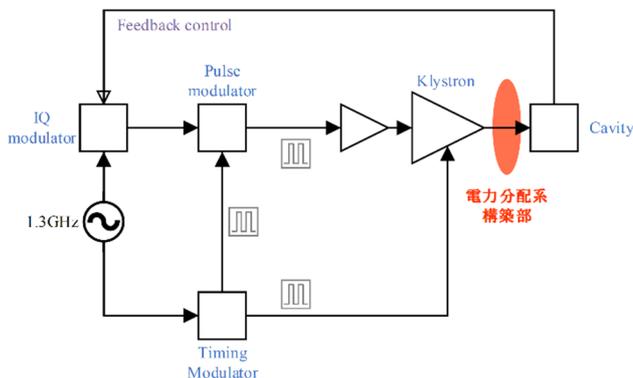


Figure 2: Diagram of the RF system for the STF-2 accelerator.

同期を取り、増幅器及びビーム加速のタイミングに合わせて、超伝導空洞へ RF を供給する (Fig. 2)。

## 2.2 電力分配系

12 台の超伝導空洞に供給する高周波系は、10 MW マルチビームクライストロン (MBK) を高周波源としている。MBK は、最大 5 MW×2 出力、RF のパワーレベルを 3 dB ハイブリッドによって二系統に分配し、局所電力分配系 (Local Power Distribution System; LPDS) [1] によって、各空洞に RF を供給する。LPDS は、可変ハイブリッド、移相器及びサーキュレーターによって構成され、各空洞の入力直前に組み込まれており、RF のパワーレベルと移相量の調整が可能となっている [3] (Fig. 3, 4)。

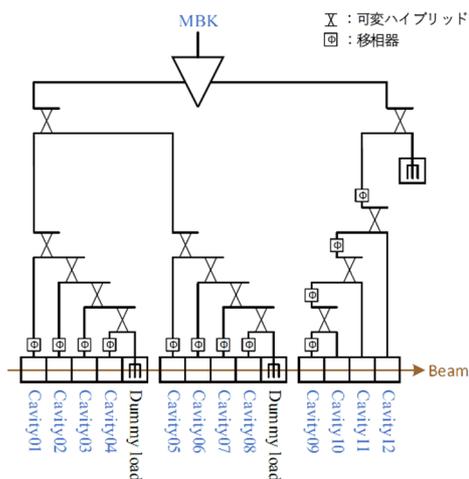


Figure 3: Diagram of RF power distribution system for the STF-2 accelerator.

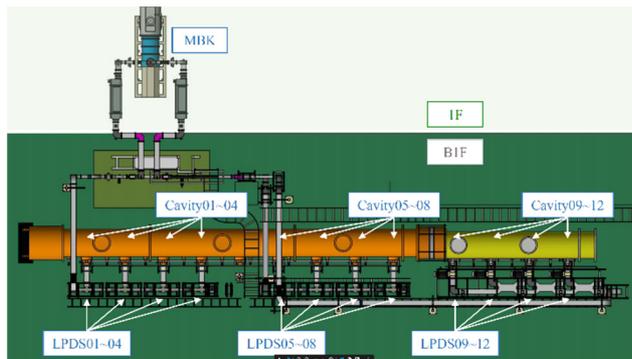


Figure 4: Top view of RF power distribution system.

## 3. 高周波源の大電力試験

### 3.1 電力分配系の調整

超伝導空洞に RF を供給するため、電力分配系の調整作業が行われた。MBK の下流から、可変ハイブリッドで RF パワーの分割比を調整した。調整は、リモートでリアルタイム操作も可能としている。RF パワーのモニタは、方向性結合器の出力を、地上部までケーブルで接続し、パワーセンサで行う。各空洞の入力信号を自動で切り換え、ソフトウェアで損失分のオフセット値も同時に切り換

える。同一のパワーセンサで、複数の入力信号のモニタを行う構成とした [2]。今季は、12 空洞の RF 入力パワー (Pf) と空洞ピックアップパワー (Pt) を、パワーセンサと切換器を 4 式で構成した。出力を等分配に調整し、12 空洞の RF 入力パワーを確認した (Fig. 5)。

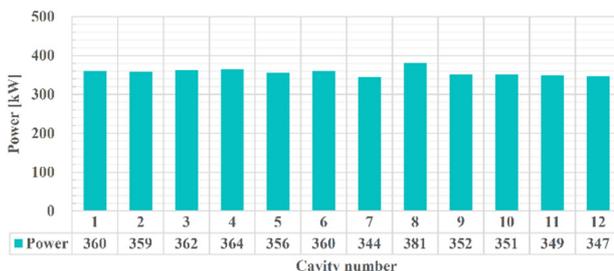


Figure 5: RF power distribution at the start of this operation.

### 3.2 大電力試験の結果

大電力試験は、繰り返し 5 Hz、RF パルス幅は 1.65 ms、MBK で 3.5 MW×2 出力を超えると、導波管内の放電によるインターロックの発報回数が増え、出力を保持できなかった (Fig. 6)。ILC で要求される、5 MW×2 出力で、39 空洞に RF を安定に供給するためには、各種導波管の開発、構築方法の検討が必要である。

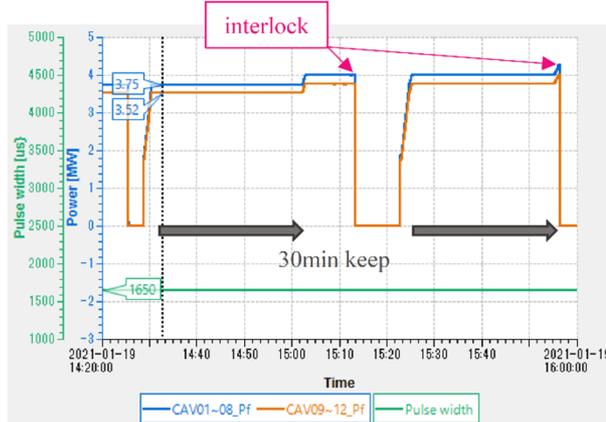


Figure 6: Graph during RF conditioning period.

### 3.3 試験時の放電

超伝導空洞の大電力試験、性能評価が進められ、それに伴い高周波系の運転も行われた。試験が進められると、導波管内の数カ所で放電の事象が見られた。高周波系は、放電検出用のモニタシステムを用いて、放電箇所の特定制を行っている。特定された導波管の内面確認を行って、適宜処置を施している [4, 5]。

今季の運転中の処置例を、一件以下に示す。MBK 出力で、2 MW ×2 出力で、運転中にインターロックが何度も発報した。インターロックの発報項目と、放電検出用のモニタで示されたのは、Cavity01~Cavity04 ラインと Cavity05~Cavity08 ラインを分割している、可変ハイブリッドの下流側だった。パワーレベルは、1 MW 程度で通過しているラインで、出力レベルは高くなかった。しかし、導波管の内面確認を行うと、放電の痕が見られ、導波管

の交換作業を行った。運転を再開したが、再び放電が起きてしまい、電力分配系の構成を検討する必要となった。

この事象を、定在波が原因で、可変ハイブリッドの下流側で放電が起きていると想定し、RF窓[1]の組み込み位置を変更した(Fig. 7)。運転を再開すると、放電の回数が減り、継続した運転ができるようになった。この現象に関しては、新設したレゾナントリング[6]によって調査を進め、高周波系の安定化を目指す。

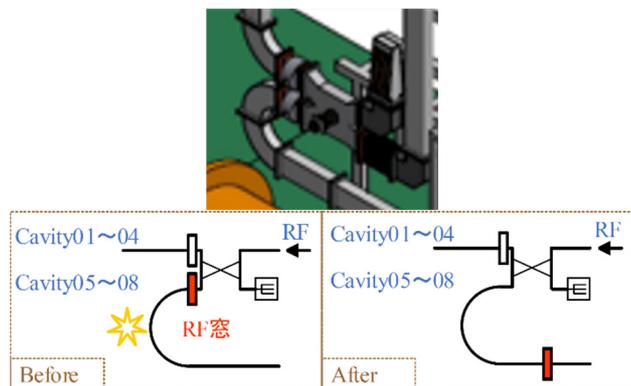


Figure 7: Location where the discharge occurred and the equipment configuration after repair.

## 4. 高周波源の位相差調整

### 4.1 入力位相差の計算

ビーム加速を最適に行うためには、超伝導空洞に供給するRFの入力位相を、最大加速位相(オンクレスト)に合わせる必要がある。各空洞に付帯した入力カップラーの設置距離から、各空洞の入力位相を算出する。設置距離を、運転周波数(1.3 GHz)の自由空間波長で除算し、その小数部に360°を積算することで、各空洞の位相差が求まる。ここではCavity01の位相差を0°として、-180°から+180°の範囲で計算結果を示す(Fig. 8)。

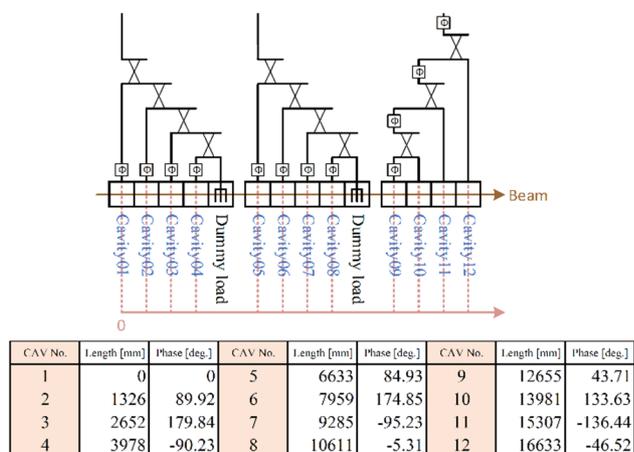


Figure 8: On-crest RF phase estimated from position of the input couplers.

### 4.2 位相差の調整作業

各空洞の最大加速勾配の調整が完了し、高周波系で、位相差の調整作業を行った。ビーム調整に向けて、移相

器の移相量を確保するため、導波管長を変更し、調整範囲を最大に取る。電力分配系はUリンク部を設けており、スペーサを使用して、導波管長の調整を行った[5]。調整値は、ネットワークアナライザを使用して確認を行う。測定結果を計算し、プロットすると、各空洞の計算値(紫)に、調整値(橙)が合っていることが確認できる(Fig. 9)。

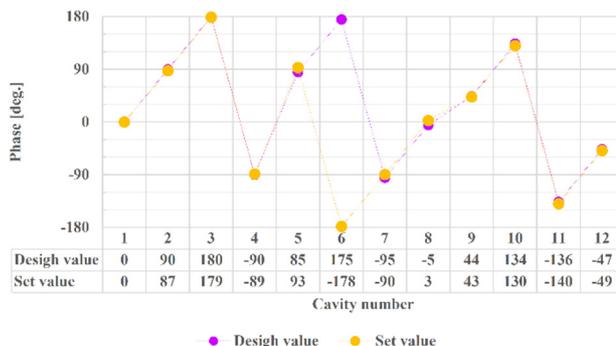


Figure 9: Phase comparison between the design values and adjusted results.

## 5. ビーム運転

### 5.1 平均加速勾配の評価

最大エネルギーの調整は、スクリーンモニターでビームの位置を確認しながら、各空洞の移相量を調整して行う。測定結果は348.73 MeVであり、取得したビームのステータスを示す(Fig. 10)。

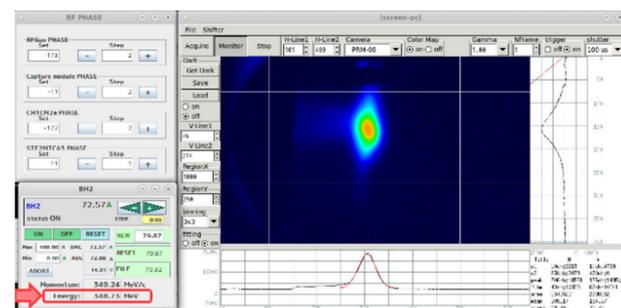


Figure 10: Display of screen monitor at the maximal beam acceleration.

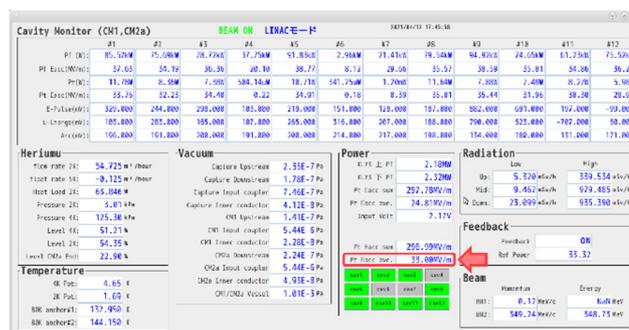


Figure 11: The cavity and RF status at the maximal beam accelerator.

12 台の超伝導空洞の、上流側で測定したエネルギーは41.23 MeVであり、その差は307.5 MeVである。この

エネルギーから、平均加速勾配を求めると 32.9 MV/m となった。また、高周波系のモニタ値 (Pt) から、算出された平均加速勾配を求めると 33.0 MV/m となった。結果を比較すると、近い値を示しており、高周波系のモニタ精度の向上が見られた。最大エネルギー調整時の空洞パラメータ、電力分配系の RF 入力パワーの分布を示す (Fig. 11, 12)。

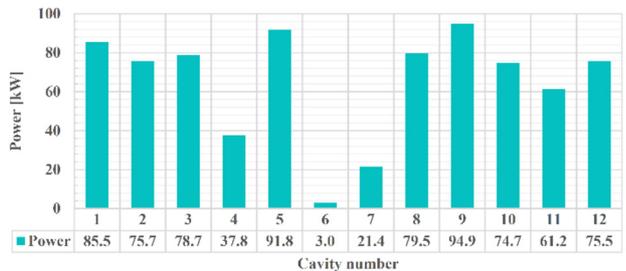


Figure 12: The RF power distribution for each cavity at the maximal beam acceleration.

## 5.2 ビーム運転後の位相差測定

ビーム運転終了後、最大エネルギー調整時の各空洞の位相差測定を行った。調整前と比較すると、各空洞で違いが見えていた。原因は不明であり、電力分配系の構築方法や調整方法等の見直しが必要となる。また、空洞内の測定も必要になると考えられる (Fig. 13)。

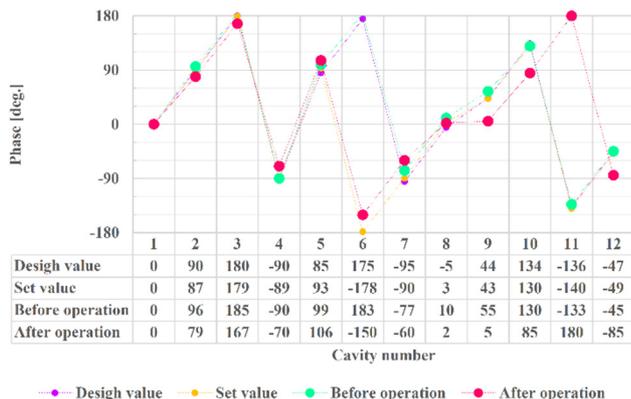


Figure 13: Phase Comparison between the design value and the maximal beam acceleration.

## 6. まとめ

高周波源の、単独運転による大電力試験の結果は、繰り返し 5Hz、RF パルス幅は 1.65 ms、MBK で 3.5 MW × 2 出力を超えると、導波管内の放電によるインターロックの発報回数が増え、出力を保持できなかった。ILC で要求される、5 MW × 2 出力で、39 空洞に RF を安定に供給するためには、各種導波管の開発、構築方法の検討が必要である。放電に関しては、新設したレゾナントリングによって調査を進め、高周波系の安定化を目指している。

電力分配系では、各空洞のクエンチリミット近くまでパワー供給し、加速位相の調整を行った。加速位相を、オンクレストに合わせるように調整を行ったが、計算値とは

違っていた。これらの原因究明を行い、高周波系の開発を進めていく。

## 参考文献

- [1] ILC Technical Design Report (2013); <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [2] T. Matsumoto *et al.*, “Status of low-level rf control system for STF2 accelerator at KEK”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 31-August 3, 2019, WEPH011.
- [3] N. Hanaka *et al.*, “Status of RF Power Distribution System Construction for ILC in STF”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan Chiba, 2016, MOP038.
- [4] N. Numata *et al.*, “Construction of RF System for RF Gun Operation at KEK-STF”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, THP059.
- [5] K. Tsutsumi *et al.*, “Construction of RF Power Distribution System for Stable Beam Operation for STF2 Accelerator at KEK”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 31-August 3, 2019, THPH009.
- [6] K. Ishimoto *et al.*, “Construction of L-band Resonant ring for high power testing of ILC waveguide components”, MOP044, in these proceedings.